

설마천 범륜사 사면 유출과정의 이해를 위한 실측토양수분 상관도 분석

Soil Moisture Measurements and Correlation Analysis to Understand the Runoff Generation Process for a Bumrunsa Hillslope of Sulmachun Watershed

김 상 현* / 강 미 정** / 곽 용 석***

Kim, Sang Hyun / Kang, Mi Jeong / Kwak, Yong Seok

Abstract

The soil moisture measurements and correlation analysis are presented to improve understanding the hydrological process at the hillslope scale. The rainfall events is a main driver of soil moisture variation, and its stochastic characteristic need to be properly treated prior to the correlation analysis between soil moisture measurements. Using field measurements for two designated periods during the late summer and autumn seasons in 2007 obtained from the Bumrunsa hillslope located at the Sulmachun watershed, prewhitened correlation analysis were performed for 8, 14, 7 and 7 relationships representing the vertical, lateral, recharge and return flows, for two designated periods, respectively. The analysis indicated both temporal and spatial variation patterns of hydrological processes, which can be explained by the relative contribution of matrix and macropore flows and the impact of transect topography, respectively.

Keywords : soil moisture, hillslope hydrology, correlation analysis, prewhitening method

요 지

이 연구에서는 산지 사면에서 측정된 토양수분의 상관 관계분석을 수행하고, 이를 통하여 사면에서 발생하는 수문과정의 이해를 도모하였다. 토양수분을 변화시키는 공통된 주요 수문기상인자인 강우의 체계학적인 특성을 토양수분의 시계열로부터 제거하고, 상관성 분석을 수행하였다. 경기도 파주 설마천 범륜사에 위치하고 있는 사면에서 2007년 8월 1일에서 27일 사이의 기간과 동년 9월 18일에서 10월 8일간의 기간에 토양수분 자료를 사용하여 분석을 수행하였고, 수행된 분석은 대상사면의 연직흐름, 수평흐름, 충전흐름, 복류수 흐름의 크기와 분포에 대해서 각각 8곳, 14곳, 7곳, 7곳의 관계를 보여주고 있다. 도출된 토양수분의 상관관계는 공간적으로는 상부사면에서 하단부로 진행되는 사면에서의 수문과정의 변화 양상을 보여주고 있고, 시간적으로는, 장마철의 경우는 토양구조체와 대공극 흐름이 모두 중요한 지배인자이지만, 가을철의 경우는 토양구조체의 흐름이 주요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 토양수분, 사면수문학, 상관분석, 선백색화 처리기법

1. 서 론

토양수분은 수문 순환과정의 가장 중요한 인자이면서,

가장 예측하기 어려운 인자인데, 그 이유는 토양수분의 시공간적인 분포가 토양의 성질, 식생의 피복, 지형 등의 다양한 인자에 의해 지배되고 있으며, 이들 인자간의 상

* 교신저자, 부산대학교 공과대학 환경공학과 교수 (e-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, San 30 Changjeondong Kumjeonggu, Busan

** 부산대학교 대학원 환경공학과 석사과정

*** 부산대학교 대학원 환경공학과 박사과정

호작용도 상당히 때문이다 (Wilson et al. 2004). 토양수분의 제어인자 중, 지형은 중간정도의 습윤 조건을 가진 사면에서 가장 두드러진 효과를 나타내는 것으로 알려졌고 (Anderson and Kneale 1980; Wilson et al. 2005), 사면에서의 토양수분에 관한 상당수 연구는 Beven and Kirkby (1979)가 제안한 지형 습윤지수로 토양수분의 공간적 변동성을 설명하였다 (Chaplot and Walter, 2003; Guntner et al. 2004; Kim et al. 2007). 또한, 불 포화대에서의 수분 거동과 측방향 급경사 지하흐름 (Subsurface storm flow)의 발생이 토양수분, 간극수압, 기반암의 지형에 의해 결정된다는 연구도 보고되었다 (Torres et al., 1998; Uchida et al., 2004).

현존하는 현장사면에서 토양수분을 획득하는 방법 중 가장 신뢰성이 있으며, 일반적으로 활용되는 방법은 Time Domain Reflectometry (TDR)을 사용하는 방법이며, 이를 통한 토양수분은 다중 시계열의 형태로 나타난다 (Walker et al., 2004). 수문변수의 시계열모의는 자료의 해석을 통한 과정의 이해나 예측을 목적으로 수행되어 왔다 (Salas et al. 1988). 시계열 분석법은 강우나 하천수의 변화와 같은 일반적인 수문변수 뿐만 아니라, 다양한 수문인자를 설명하는데 이용되어졌는데, 예를 들면, 지하수 깊이 (Knotter and De Gooijer, 1999), 하천의 질소농도변화 (Worrall and Burt, 1999) 혹은 식생의 증산을 모의하는 모근 흐름 모의 (Ford et al., 2005)하는 데도 적용되어왔다. 사면에서의 토양수분의 추계학적인 구조를 이론적으로 규명하려는 시도나 (Ridolfi et al. 2003), 관측값의 시계열 모형을 도출하여 이를 지형인자와 연계하여 설명하려는 연구도 이루어졌다 (Kim and Kim, 2007; Kim, 2009a).

사면에서의 강우의 발생으로 시작되는 침투, 측 방향 흐름의 발생, 충전, 복류수 유출 같은 일련의 수문학적 과정의 심도 깊은 이해를 위해서는, 현장 사면에서의 토양수분 실측을 근거로 집중분석이 필요하며 (Kim et al. 2007; Kim, 2009a,b), 이를 위해서 경기도 파주군 설마리에 위치하고 있는 설마천 상류부의 범류사 우측사면에 토양수분 관측시스템을 설치하였다. 정확한 토양수분의 실측값의 확보를 위해서, 현존하는 TDR방식의 토양수분실측기기 중 가장 정확도가 높은 다중 동축 TRASE system (Soil Moisture Corp. 2005)를 현장에 설치하였으며, 이로부터 2007년 여름철부터 관측 자료를 확보하였다.

기존의 동일사면에서 관측된 토양수분자료의 분석 (Kim et al. 2007; Kim, 2009a,b)은 토양수분과 이들의 영향인자와의 관계를 규명하는 연구가 주된 내용이다. 사면에서의 수문기작의 규명을 위해서는 관측된 토양수분자료들이 어떻게 서로 관련되어 있는가를 규명하는 것이 유용한 접근법이다. 이들 자료 분석은 확보된 토양수분 자

료간의 상관성 분석으로 수행될 수 있는데, 실측된 토양수분자료는 공통된 강우의 추계특성에서 기인한 상당한 자기상관성을 가지는 특성을 가지고 있다. 이는 토양수분 원자료간의 일반적인 상관성 분석으로는 인과성을 규명하기 난해하다는 것을 의미한다. 따라서 이 논문에서는 신뢰성 있는 시계열 상관성 해석 문제의 해결을 위한 방법론을 제시하고, 이를 실측된 자료에 적용하여, 그 결과를 대상 사면에서 발생하는 연직침투, 측 방향 흐름, 재충전, 복류수 유출의 기작을 연계하여 설명하는 것을 목적으로 한다.

2. 대상유역과 대상사면

본 연구의 대상 유역인 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리에 위치한 설마천 유역은 산지 소유역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료에 대한 지속적 관측과 자료 축적을 위해 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있으며 설마리에 위치한 영국군 전적비교를 출구로 하는 설마천 중상류 유역이 시험유역이다 (Fig. 1). 이는 연구에서 수행하는 토양수분관측 연구가 현재 진행 중이거나 이미 수집된 다양한 수문자료와 함께 사용될 수 있는 장점을 의미하고, 수문기작을 연구하는 중요한 기반이 될을 의미한다. 대상유역의 기초정보로서는 유역면적 8.50 km², 유로연장 5.80 km, 유로경사 2.3%로 전형적인 급경사 산지 사행하천이다. 지질학적 형상은 작은 절리가 많이 발달되어 있고, 엽리의 절리로 작용하는 지질구조상 강우초기에는 하천의 수위에 큰 변화를 보이지 않다가 파쇄대를 채운 후에 하천의 수위가 급격히 증가하는 양상을 보인다. 시험유역에는 6개 우량관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 운영되고 있다. 일상적인 관측기기의 유지관리와 수문기상관측 및 관측 자료의 검토 등 일련의 수문기상관측 및 관측 자료의 검토 등 일련의 수문관측 및 자료처리 과정을 통해 양질의 우량과 수질, 기상 자료 등을 10분 단위로 생성하고 있다 (한국건설기술연구원, 2006).

토양수분 관측망을 운영할 대상사면은 경기도 파주시 적성면 설마리의 설마천 유역내 감악산 범류사 우측 산지 사면이다. 대상 사면의 크기는 약 4000 m²이며, 비교적 급경사사면으로 설마천의 상부 사면중 하나이다. Fig. 1은 대상유역과 토양수분 측정사면의 지정학적인 위치를 보여주고 있다. 대상유역의 위도와 경도는 각각 37°55'67"와 126°57'25"이다.

대상사면의 식생은 침엽수림과 활엽수림의 혼합으로 구성되어 있으며, 구체적으로는 사면은 Polemoniales와 Quercus로 이루어졌다. 대상사면 전체에 걸쳐 상당한 대공극 구조가 발달되어 있음을 육안으로 확인할 수 있다.

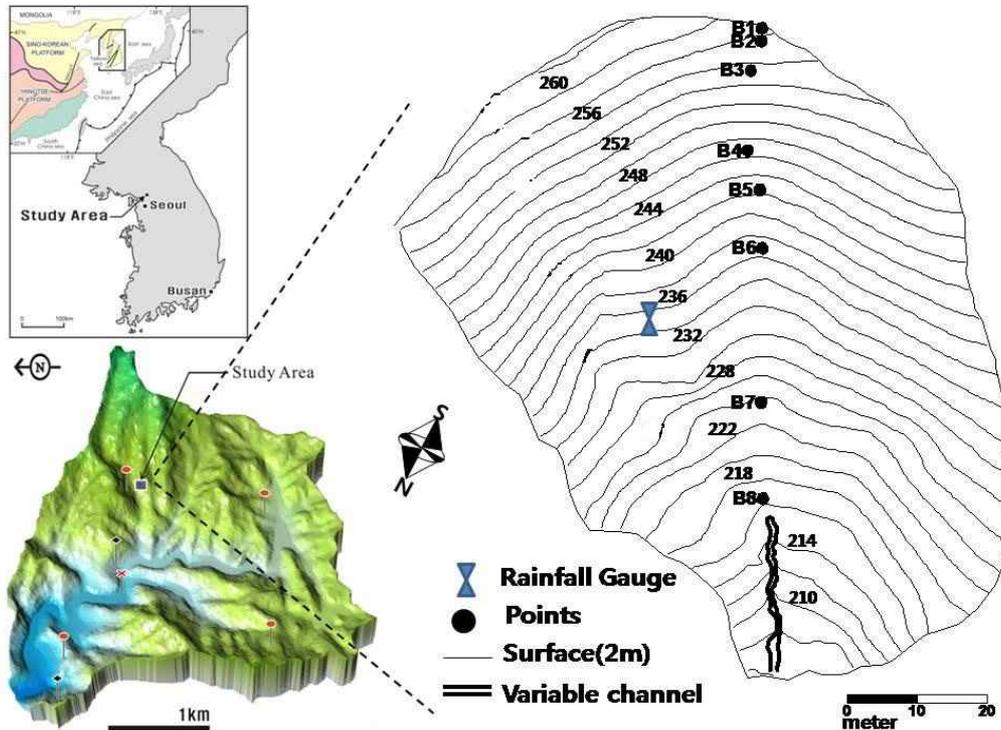


Fig. 1. Sulmachun Watershed and the Study Area with Locations of Soil Moisture Sensors

지질학적으로는 화강암 구조의 기반암위에 편마암 복합체로 구성되어 있으며, 절리나 파쇄대가 발달되어 있으나 그 크기는 미소하고, 이들의 연결성 또한 무시할 수 있을 정도로 작다. 대상지역의 주요 토양들은 FAO 분류기준에 따르면 Leptosols로 구성되어 있는 광물성 토양이다. 대상 사면의 토심의 깊이는 약 20~120 cm의 분포를 보이며, 지반암의 분포도 급격한 경사와 비교적 낮은 함수능을 보이는 특성을 가지고 있다. 대상사면의 하단에는 자연발생 하천이 있고, 강우 시 유출반응이 나타난다.

3. 수치지형분석과 토양수분측정시스템의 설치

최적의 토양수분 측정망을 구축하기 위해서는 강우 유출 사상시 발생하는 흐름 경로를 예측하고, 공간 유출 특성을 감지할 수 있는 의사결정과정을 수행해야 한다. 이를 위해서는 현장 사면에 정밀 수치지형모형 (Digital Elevation Model: DEM)을 확보하여 이를 바탕으로 흐름 발생 경로를 계산하여 토양수분 센서의 공간적 분포를 결정할 필요가 있다 (Quinn et al. 1991).

연구 대상지역인 설마천 범륜사 사면의 정밀한 DEM 구축을 위해 Theodolite (DT-208P, TOPCON)을 이용해 직접 측량 하였다. 측량을 통하여 얻어진 각 좌표 정보를 좌표변환 알고리즘에 적용하여 데카르트 좌표로 변환하고 이를 통해 연구 대상사면인 범륜사 우측사면에 대한 1

m 간격의 DEM을 구축하였다.

측량을 통해 얻어진 1m 간격 정밀 DEM을 이용하여 토양수분 장기 모니터링을 위한 시스템을 구축하는 과정은 다음과 같다. 구축된 1m 정밀 DEM을 흐름분배 알고리즘에 적용하여 우선 흐름경로를 파악, 고려하여 측정지점을 선정한다 (Kim, 2009a,b). Fig. 1의 Surface는 구축된 DEM의 등고선을 의미한다. Fig. 2는 흐름 분배 알고리즘 (MD8 Algorithm)에 적용시킨 결과인 기여사면적과 지형 습윤지수 (Beven and Kirkby, 1979; Quinn et al., 1991)의 공간적인 분포를 도식한 결과이다. Fig. 2의 상대적으로 진한부분은 습윤도가 높은 지점을 의미하고 그 반대는 낮은 경우를 의미한다 (Kim, 2009a,b). 이중 중간의 경사면 (B transect)를 따라서 측정지점을 선정하였고 이는 Fig. 1에 도식되어 있다. Fig. 1에서 B1에서 B8까지의 지점은 습윤도 분석을 통해서 결정된 토양수분 센서를 매설한 지점의 위치를 나타낸다. 확정된 측정지점 좌표들을 역 좌표변환 알고리즘에 적용하여 각 좌표로 변환하고 Theodolite를 이용해 역 측량을 수행하여 지정된 지점에 센서를 매설하였다. 센서의 매설은 대상지점의 토양층 교란을 최소화하기 위해서 토양을 연직 방향으로 굴착한 뒤 상부사면 방향을 향하여 센서를 사면의 경사와 평행하게 설치함으로 설치 지점의 교란이 없도록 수행하였다. 센서의 매설깊이는 모든 지점에서 10 cm와 30 cm 깊이에서 수행되었고 상대적으로 토양층 깊이가 깊은 하단부 일부 지점(B7, B8)

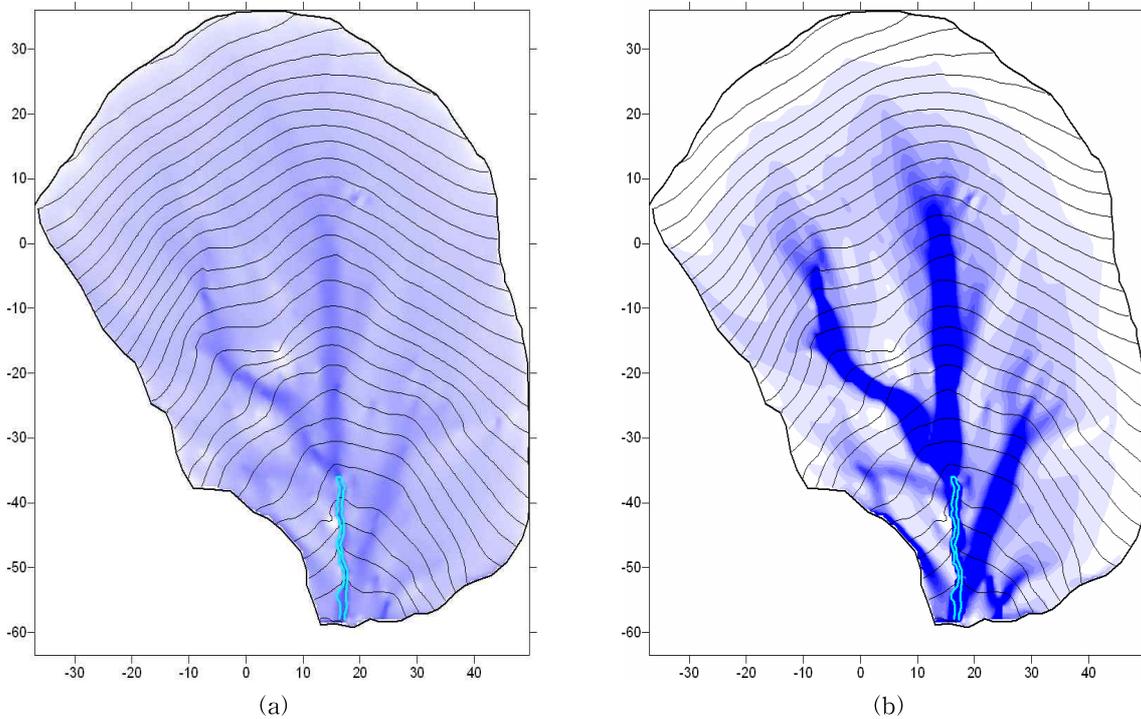


Fig. 2. Upslope Contributing Area (a) and Topographic Wetness index (b) through Application of MD8 algorithm (Quinn et al., 1991) to the DEM of Study Area

60 cm 깊이에서도 관측되었다. 하단부 지점들 (B7이나 B8)의 60cm 경우 토양수분이 Transect B가 아닌 다른 경사면으로의 유입에 영향을 받음으로 본연구의 상관관계 해석에서는 배제하였다.

4. 시계열자료 상관분석법

시계열자료의 분석에 선행하여 모든 자료들의 통계적인 특성이 시계열분석에 적합한지를 평가해야한다 (Salas et al. 1988). 만약, 시계열자료의 통계적인 분포가 정규분포와 상당히 다르면, 이 자료를 가지고, 모형의 매개변수를 추정하는 우도 추정법을 수행할 때, 왜곡된 결과를 도출할 수 있기 때문이다. 각각의 시계열의 통계분석은 대상 시계열의 도식을 통한 평가와 평균, 표준편차, 왜곡도 및 중도계수를 산정하는 방식으로 진행된다. 이와 같은 선행 통계분석을 통해서 특정 시계열의 통계분포가 시계열 분석에 적합하지 못한 것으로 판명되면, 적절한 전환을 수행해야하는데, 이 연구에서는 Box-Cox 전환을 사용하였다 (Box and Cox 1964). Box-Cox 전환은 가장 일반적으로 사용되면서도, 시계열의 경향이나 주기성을 완화시켜주는 장점도 있다. Box-Cox 전환은 다음과 같이 나타내는데,

$$X_t = \frac{(Z_t^\lambda + C)}{\lambda}, \lambda \neq 0 \text{ or } X_t = \ln(Z_t + C), \lambda = 0 \quad (1)$$

여기서, Z_t 는 토양수분 시계열, X_t 는 변환된 시계열, C 와 λ 는 상수이고, 첨자 t 는 시간을 의미한다.

분석 대상 시계열의 추계학적인 특성을 제거하기 위해서 적절한 모형이 필요하다. 이 연구에서는 모든 토양수분이 강우로부터 동일한 영향을 받는다고 가정하고, 강우 시계열의 추계학적인 특성을 제거하는 과정에 집중하였다. 강우 시계열의 특성은 자기 상관함수, 편자기상관함수 혹은 확장자기상관함수로 불리는 Corner표에 의해 식별될 수 있다 (Liu and Hanssens, 1982). 식별된 모형을 사용하여 시계열 모형을 구성하면 다음과 같이 나타나는데,

$$\Phi_y(B) \cdot Y_t = \Theta_y(B) \cdot n_t \quad (2)$$

여기서, $\Phi_y(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_n B^n$ 이고, $\Theta_y(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_m B^m$ 을 나타내며, Y_t 는 강우 시계열, B 는 과거지향 연산자를 의미하는데 이는 $B^k Y_t = Y_{t-k}$ 를 의미하고, n_t 는 잔차를 의미한다.

Eq. (2)에 의해서 강우시계열의 모의가 수행되며, 잔차의 자기상관함수와 편자기상관함수를 산정하여 이들이 유의수준 (significance level)이내이면 적절한 모형으로 결정된다. 이때 결정된 모형과 매개변수를 사용하여, 토양수분의 시계열을 처리하는데 활용되는데, 이 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\Phi_y(B) \cdot X_t = \Theta_y(B) \cdot u_t \quad (3)$$

Eq. (3)에서 확보되는 u_t 는 이 연구에서 사용되는 선 처리 백색 시계열 (Prewhitened Time Series)이며, 이를 사용하여, 상관도 분석이 이루어진다. 이 시계열은 토양수분 시계열중 강우와 관련된 추계학적인 구조를 제거한 것으로 토양층에서 일어나는 침투, 토양증발 등의 특성을 내재하고 있다.

토양수분의 원 시계열의 상관도 분석은 다음과 같은 식으로 수행될 수 있다.

$$r_{x1,x2} = \frac{C_{x1,x2}}{\sqrt{C_{x1,0} \cdot C_{x2,0}}} \quad (4)$$

여기서, $C_{x1,x2}$ 는 두 개의 시계열사이의 공분산을 의미하고, $C_{x1,0}$ 과 $C_{x2,0}$ 는 각각의 시계열의 분산을 의미한다.

선 처리 백색 시계열사이의 상관도 분석은 다음과 같이 나타나는데,

$$r_{u1,u2} = \frac{C_{u1,u2}}{\sqrt{C_{u1,0} \cdot C_{u2,0}}} \quad (5)$$

여기서, $C_{u1,u2}$ 는 Eq. (3)의 일련의 적용과정에서 도출되는 두 개의 잔차 시계열의 공분산을 의미하고, $C_{u1,0}$ 과 $C_{u2,0}$ 는 각각의 분산을 의미한다.

Eqs. (4) and (5)의 적용은 각각의 토양수분 시계열이 상호 상관되어 있는가, 자기상관성이 얼마나 존재하는가, 혹은 완전한 백색잡음인가에 따라서, 상관함수의 분산은 다르게 나타난다. 이 연구에서는 자기상관함수의 유의수준을 백색잡음의 가정에서 추정하였다.

5. 분석과정

Figs. 3(a) and (b)는 대상구역에서 각각 2007년 8월 1

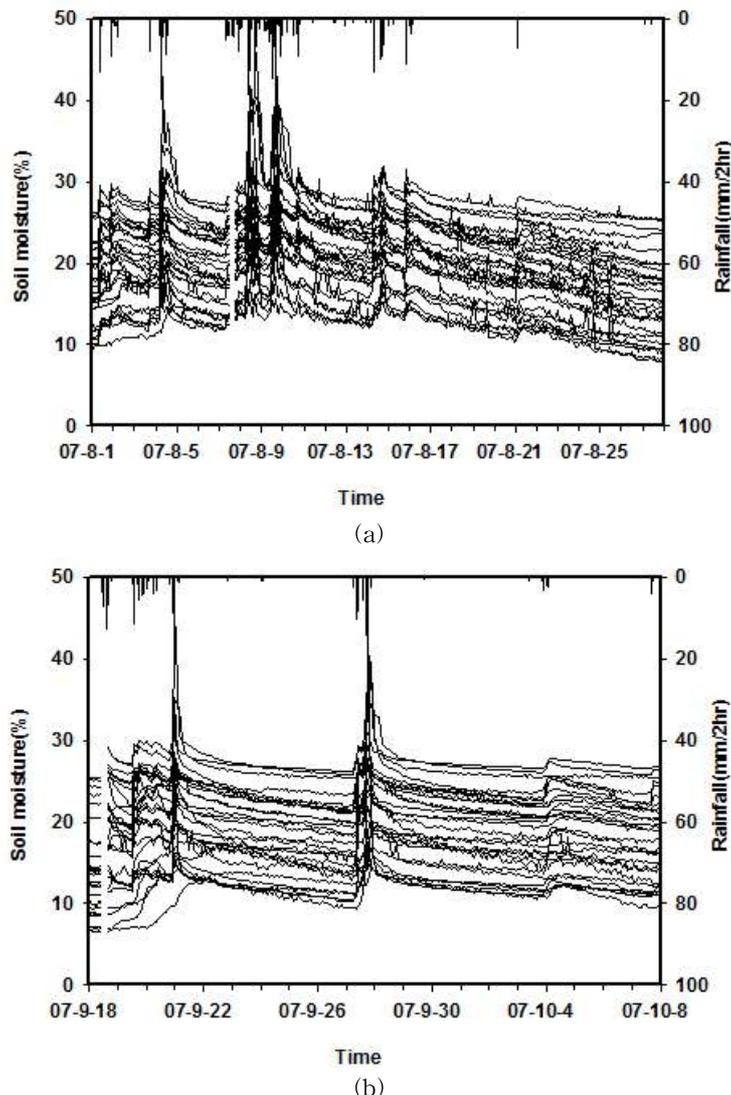


Fig. 3. Soil Moisture Measurements during August 1st and 27th in 2007 (a); and during September 18th and October 8th (b)

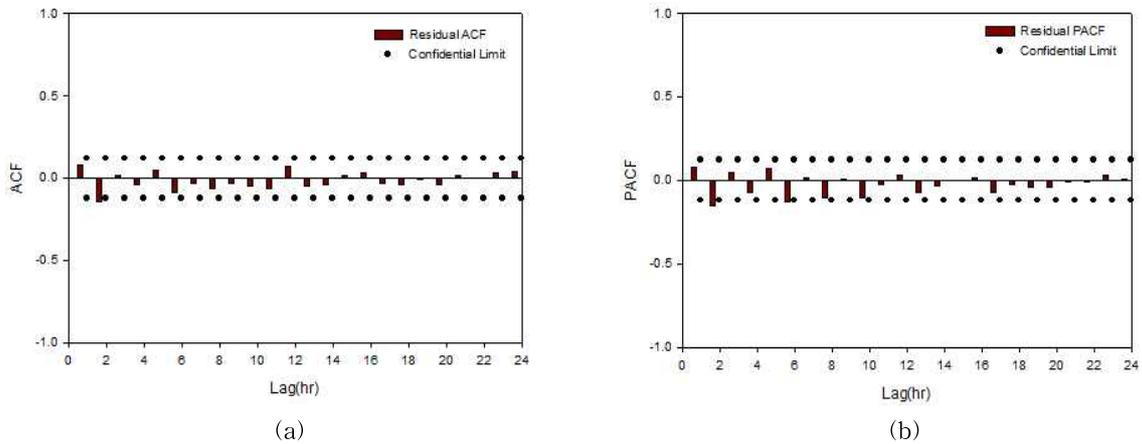


Fig. 4. Autocorrelation Function (ACF) of Residual (a); and Partial Autocorrelation Function (PACF) of Residual (b)

일에서 27일까지 그리고 2007년 9월 18일에서 10월 8일까지 관측된 토양수분과 강우 시계열을 도식한 그림이다. 이 두 기간은 여름철 장마기간의 대표적인 토양수분변화와 가을철 기간의 토양수분의 변화를 나타내기 위해서 선택된 경우이다. 두 기간의 강우의 주요차이는 강우빈도로 Fig. 3(a)에서 보이는 강우의 분포가 Fig. 3(b)보다 상대적으로 조밀한 강우사상을 확인할 수 있다. 두 기간 모두 토양수분은 강우에 의해 증가되는 양상을 보이고, 강우이후에는 점차로 감소되는 양상을 보인다. Fig. 3(a)에 해당되는 장마기간에는 가을철의 토양수분반응과 구분되는 특성이 보이는데, 이는 무 강우 시 나타나는 토양수분의 변동이다. Fig. 3(a)의 상당수 토양수분 시계열은 감소 부분중 크기는 작지만 급격한 증가와 감소 양상을 보인다. 이는 장마철에 토양층의 수분흐름이 토양구조체 흐름(Matrix Flow)으로만은 설명될 수 없고, 대공극 흐름(Macropore Flow)의 발생이 강력한 원인으로 판단된다. 배수과정에서 미세 공극구조의 변화로 상당한 토양수분의 흐름에 변동이 나타나는 것으로 판단된다(Kim, 2009a,b).

Fig. 3의 토양수분 원 시계열의 통계분석을 통하여, 자료의 정상성과 경향성을 파악하였고, 높은 왜곡도 계수를 보이는 상당수 자료에 대해서 Eq. (1)의 Box-Cox 변환을 수행하였다. 상당한 시행착오를 반복한 후 대부분의 시계열에서 자료의 정상성을 상당히 개선하였다. 두 기간의 강우자료는 왜곡도 계수가 각각 3.68, 5.07에서 0.72와 0.79로 개선되었고, 토양수분자료의 경우 두 기간에 대해서 변환된 자료를 기준으로 각각 2.28 그리고 0.417 만큼 왜곡도 계수가 감소하는 효과를 보였다. 강우자료의 자기상관함수와 편자기 상관함수 그리고 확장자기상관함수인 Corner Table을 계산하였고 이로부터 적용 가능한 복수의 모형을 선택한 후 시행착오법의 과정을 통하여 적절한 모형을 도출하였다. 모형구조의 경제성을 고려하여 강우

모형은 1차 차분한 MA(1)모형이 선정되었고, 모형을 사용한 모의의 잔차의 추계학적인 특성을 계산하였다. Figs. 4(a) and (b)는 강우모의과정에서 도출된 잔차의 자기상관함수와 편자기상관함수를 유의수준과 비교하여 나타내고 있는데, 두 Fig. 모두 잔차의 잔여 추계학적 특성이 무시할 수 있음을 보여주고, 이는 강우모의과정이 적절함을 의미한다.

Figs. 5(a) and (b)는 B1-10 (B1지점의 10cm 깊이 지점) 과 B1-30 (B1지점의 30cm 깊이 지점)사이의 원시계열의 교차 상관함수(Eq. (4))와 강우모형으로 선택색 처리한(Eq. (3)) 잔차 시계열의 교차상관함수(Eq. (5))의 계산결과를 각각 유의수준과 함께 도식하였다. 원시계열의 상관함수(Fig. 5(a))는 -14시간에서 +40시간까지의 광범위한 교차 상관성을 보여주고 있는데 이는 물리적인 근거가 빈약한 결과이다. 그 이유는 40시간 전의 B1-30의 토양수분이 그보다 얇은 깊이인 B1-10의 토양수분에 영향을 준다는 것을 의미하기 때문인데, 이는 수문학적으로 불가능한 현상이다. 이와 같은 결과는 토양수분 자체의 자기상관성과 관련된 강우로 유발된 토양수분의 변동구조가 원인이다. 따라서 선택색 처리과정을 통과한 잔차의 상관관계가 유효하다. Fig. 5(b)에 도식되어 있는 잔차 시계열의 교차상관함수는 약 0시간에서 -10시간까지의 상관성을 보여주고 있는데, 이는 10cm 깊이에서의 토양수분의 약 10여 시간 선행정보가 30cm 깊이에서의 토양수분과 상관성을 보여주는 결과로 의미 있는 결과로 판단된다.

Fig. 5와 같은 선택색 처리기법을 사용한 잔차의 상관함수를 Fig. 1의 토양수분관측망의 모든 관계에 대해서 적용하여 교차 상관함수를 계산하였다. 총 16개의 토양수분에 대해서 연직흐름의 관계는 8개, 수평흐름의 관계는 14개 그리고 충전흐름의 관계는 7개 그리고 복류수 흐름

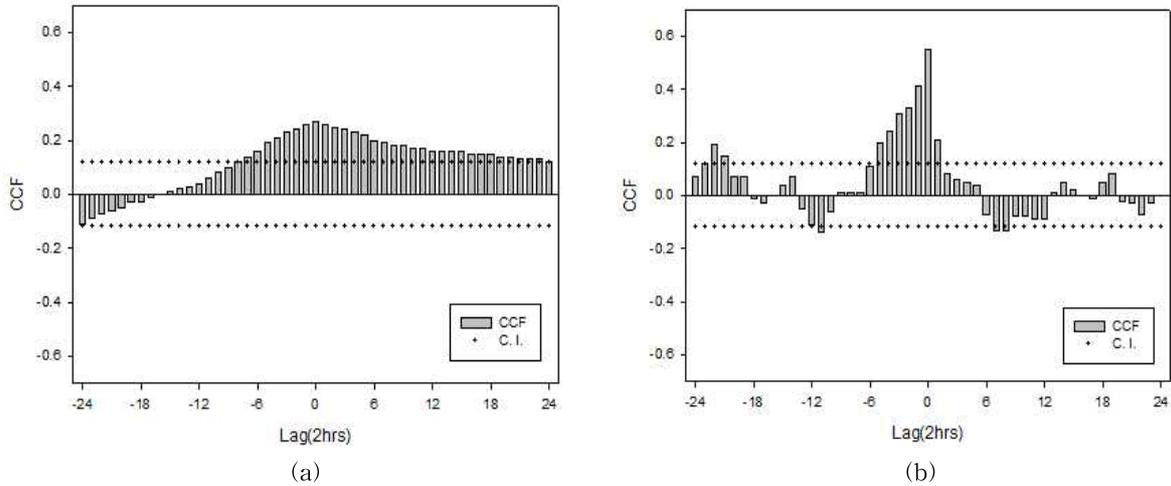


Fig. 5. Cross Correlation Function (CCF) of Original Soil Moistures between A1-10 and A1-30 point (a); CCF of Prewhitened Soil Moistures between A1-10 and A1-30 points (b); C. I.: Significance Level

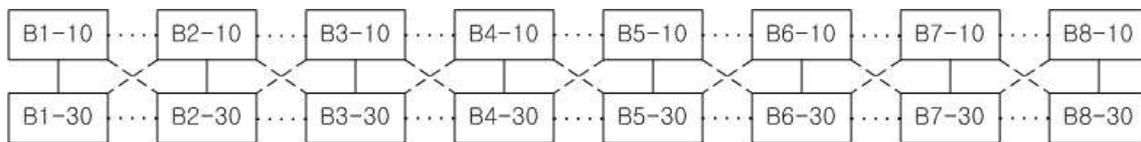


Fig. 6. Schematic for Cross Correlation Relationships along Transect B in Fig.1; The Dotted, Solid and Dashed Line Are for Lateral, Vertical and Recharge and Return Flows, Respectively

Table 1. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Vertical Soil Moisture Profile During Aug. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-10	B1-30	0.10	0.20	0.31	0.33	0.41	0.55	0.21	0.08	0.06	0.05	0.04
B2-10	B2-30	0.03	0.02	0.03	0.07	0.07	0.10	0.09	0.08	0.00	0.04	-0.02
B3-10	B3-30	0.07	0.20	0.16	0.24	0.38	0.71	0.27	0.03	0.12	0.08	-0.06
B4-10	B4-30	-0.05	0.13	0.09	0.07	0.22	0.79	0.23	0.06	0.05	0.02	-0.06
B5-10	B5-30	-0.01	0.09	0.09	0.03	0.19	0.74	0.21	0.00	0.07	0.07	0.01
B6-10	B6-30	0.04	0.13	0.14	0.13	0.37	0.79	0.17	0.03	0.11	0.10	0.00
B7-10	B7-30	-0.03	-0.03	-0.05	-0.08	0.39	0.88	0.21	-0.06	-0.02	-0.06	-0.09
B8-10	B8-30	-0.08	-0.05	-0.05	-0.09	0.28	0.51	0.35	0.08	-0.04	-0.05	-0.06

의 관계는 7개의 함수관계가 성립한다. Fig. 6은 이와 같은 관계들에 대한 모식도이다.

6. 결과 및 토의

6.1 장마철 기간의 상관분석

Table 1은 Fig. 6의 연직흐름 관계 중 10 cm (initial point)에서 30 cm (final point) 깊이의 관계를 2007년 8월의 자료 분석에 대한 것을 정리한 것이다. 지체시간 (Lag)의 단위는 2시간 간격이다. 예를 들면, 지체 시간이 -5인

경우는 B1-10의 10시간 이전의 토양수분이 B1-30의 토양수분과 상관관계를 나타낸 것이고 지체시간이 0인 경우는, 현재의 B1-10과 B1-30의 관계를 지체시간이 5인 경우는 B1-10의 10시간 이후의 토양수분과 B1-30의 관계를 의미한다. Table 1의 진한글체는 잔차 상관함수가 유의수준을 초과하는 것을 나타내고 있는데, 전체적으로 과거습윤 정도와 상관함수를 보이고 있으며, 이는 토양수분의 지체된 전달효과를 의미한다. B1에서 B8에 이르는 하단부 사면으로 가면서 이와 같은 상관함수의 지체시간 간격이 작아지는 경향을 보이는데, 이는 보다 신속한 토양

Table 2. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Flow of Soil Moisture at the Depth of 10 cm During Aug. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-10	B2-10	0.03	0.05	0.05	0.1	0.15	0.09	0.12	0.09	0.11	0.04	-0.01
B2-10	B3-10	-0.04	0.02	0.00	0.02	0.09	0.16	0.17	0.10	0.07	0.04	0.03
B3-10	B4-10	-0.04	0.01	0.11	0.03	0.25	0.83	0.32	0.11	0.19	0.09	-0.03
B4-10	B5-10	-0.02	0.03	0.12	0.07	0.22	0.68	0.21	0.07	0.06	0.05	-0.02
B5-10	B6-10	-0.01	0.08	0.05	0.05	0.13	0.71	0.21	0.01	0.12	0.08	-0.01
B6-10	B7-10	-0.06	0.02	0.08	0.15	0.23	0.60	0.06	-0.03	0.13	0.09	-0.05
B7-10	B8-10	-0.03	-0.01	0.04	-0.01	0.3	0.71	0.15	0.02	0.03	-0.01	-0.1

Table 3. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Flow of Soil Moisture at the Depth of 30 cm During Aug. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-30	B2-30	0.00	-0.02	0.16	0.12	0.19	0.31	0.30	0.21	0.17	0.19	0.12
B2-30	B3-30	0.07	0.20	0.16	0.24	0.38	0.71	0.27	0.03	0.12	0.08	-0.06
B3-30	B4-30	-0.04	0.04	0.07	0.01	0.16	0.59	0.35	0.21	0.11	0.19	0.05
B4-30	B5-30	-0.04	0.11	0.08	0.08	0.23	0.77	0.19	0.03	0.07	0.03	0.00
B5-30	B6-30	0.05	0.11	0.11	0.12	0.32	0.81	0.23	0.08	0.14	0.12	0.00
B6-30	B7-30	-0.02	0.00	0.12	0.19	0.30	0.47	0.15	0.09	0.14	0.07	0.02
B7-30	B8-30	-0.08	-0.05	-0.05	-0.09	0.28	0.51	0.35	0.08	-0.04	-0.05	-0.06

Table 4. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Soil Moisture Recharge from the Depth at 10 cm to 30 cm During Aug. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-10	B2-30	-0.03	0.03	-0.01	0.12	0.27	0.14	0.20	0.14	0.22	0.13	0.10
B2-10	B3-30	-0.02	0.03	0.04	0.02	0.11	0.15	0.18	0.09	0.05	0.05	0.01
B3-10	B4-30	-0.01	0.03	0.12	0.02	0.25	0.79	0.31	0.10	0.10	0.11	-0.01
B4-10	B5-30	-0.05	0.03	0.13	0.11	0.21	0.76	0.22	0.06	0.09	0.04	-0.02
B5-10	B6-30	0.05	0.12	0.11	0.13	0.34	0.69	0.23	0.06	0.12	0.08	0.04
B6-10	B7-30	-0.01	0.03	0.08	0.18	0.37	0.48	0.00	-0.01	0.14	0.03	-0.06
B7-10	B8-30	-0.02	0.00	-0.07	-0.08	0.33	0.45	0.29	0.08	-0.03	-0.05	-0.08

수분의 이동패턴이 하경사 방향으로 두드러지게 나타남을 의미한다.

Table 2는 10 cm 깊이에서의 측 방향 흐름의 관계를 보여주고 있다. 측 방향 흐름의 경우는 사면의 중상단부(B3-B4) 관계부터 높은 상관성을 보이고 있으며, 이는 하경사 방향으로의 일정 습윤도가 축적된 이후의 관계형성의 기작효과로 이해될 수 있다. Table 3은 30 cm 깊이에서의 측 방향 흐름의 관계를 보여주고 있다. 보다 깊은 지점간의 관계는 일반적으로 보다 장기간의 높은 상관성을

보여주고 있는데 이는 해당기간이 장마기간이고 상대적으로 깊은 토양층에 충분한 수분이 축적된 결과이다.

Table 4와 Table 5는 Fig. 6의 관계중 상부사면의 얕은 깊이에서 하부사면의 깊은 지점으로 형성되는 충전흐름과 상부사면의 깊은 깊이에서 하부사면의 얕은 깊이로 형성되는 복류수 흐름의 관계를 보여주고 있다. 측 방향 흐름이나 연직흐름의 경우와는 다르게 시발지점과 목적지점의 관계에서 +지체정보에 상당한 함수관계가 나타나는 것으로 나타났다. 이는 충전흐름이나 복류수 흐름의 시발

기작이 상부사면이 아닌 하부사면 지점임을 의미한다. 일정한 토양수분이 축적되면 이로부터 충분한 인과관계가 성립될 수 있는 흐름기작의 발달이 하부사면에서 상부사면으로 진행된다는 것을 의미한다. Table 1에서 Table 5는 모든 관계가 상부사면에서 하부사면으로 진행될수록 일정한 양상에 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 높은 습윤도의 하단부사면의 경우 이들 관계가 안정적으로 형성되는 것을 의미한다.

6.2 가을철 기간의 상관분석

Table 6에서 Table 10은 Table 1에서 Table 5의 관계를 2007년 9월에서 10월까지의 관계에 대해서 분석한 결과이다. 두 기간 간의 상관관계는 유사성과 차이점이 관찰되는데, 차이점은 상부사면의 경우에 두드러진다. 예를 들면 Table 6의 B2지점의 연직 흐름이나 Table 7의 B2지점과 B3지점사이의 측 방향 흐름은 상당한 차이를 보인다. 이는 상부사면 지점들의 기작이 강우 양상의 변동에

Table 5. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Soil Moisture Return Flow from the Depth at 30 cm to 10cm During Aug. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-30	B2-10	0.01	0.01	0.01	0.06	0.07	0.19	0.16	0.08	0.12	0.09	0.11
B2-30	B3-10	-0.01	-0.01	0.03	0.03	0.12	0.37	0.29	0.22	0.13	0.17	0.15
B3-30	B4-10	-0.07	0.02	0.06	-0.01	0.17	0.60	0.34	0.25	0.17	0.19	0.07
B4-30	B5-10	-0.02	0.07	0.06	0.05	0.23	0.70	0.19	0.05	0.06	0.04	0.00
B5-30	B6-10	-0.01	0.07	0.10	0.00	0.17	0.85	0.20	0.02	0.11	0.11	-0.05
B6-30	B7-10	-0.05	-0.01	0.10	0.18	0.18	0.53	0.23	0.12	0.14	0.10	0.01
B7-30	B8-10	-0.02	-0.04	0.03	0.01	0.24	0.70	0.28	-0.01	0.00	0.01	0.01

Table 6. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Vertical Soil Moisture Profile During Sept. and Oct. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-10	B1-30	0.03	0.02	0.01	0.03	0.05	0.02	0.11	0.15	0.03	-0.04	0.11
B2-10	B2-30	-0.02	0.04	0.05	-0.01	0.10	0.10	0.30	0.21	0.22	0.30	0.47
B3-10	B3-30	0.01	0.20	0.26	0.31	0.62	0.65	0.24	0.05	0.01	-0.05	-0.13
B4-10	B4-30	-0.08	0.03	0.14	0.19	0.48	0.91	0.25	0.13	0.10	-0.06	-0.15
B5-10	B5-30	-0.12	0.02	0.14	0.20	0.46	0.91	0.36	0.14	0.15	-0.02	-0.15
B6-10	B6-30	-0.01	0.10	0.13	0.27	0.66	0.74	0.27	0.23	0.17	-0.03	-0.25
B7-10	B7-30	-0.04	0.11	0.18	0.21	0.62	0.69	0.21	0.06	0.11	0.01	-0.16
B8-10	B8-30	-0.21	-0.19	0.07	-0.08	0.15	0.63	0.19	0.01	0.01	-0.02	-0.03

Table 7. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Flow of Soil Moisture at the Depth of 10 cm During Sept. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-10	B2-10	0.02	-0.03	0.05	0.02	0.11	0.11	0.10	0.09	0.12	0.18	0.10
B2-10	B3-10	-0.08	0.00	0.02	-0.05	0.02	0.25	0.35	0.34	0.35	0.47	0.51
B3-10	B4-10	-0.13	-0.03	0.03	0.11	0.46	0.85	0.46	0.23	0.15	0.06	-0.04
B4-10	B5-10	-0.12	-0.01	0.11	0.18	0.50	0.84	0.29	0.13	0.11	-0.02	-0.15
B5-10	B6-10	-0.23	-0.04	0.13	0.24	0.33	0.82	0.64	0.22	0.08	0.02	-0.08
B6-10	B7-10	-0.12	0.01	0.06	0.16	0.49	1.00	0.49	0.16	0.06	0.01	-0.12
B7-10	B8-10	0.00	0.08	0.20	0.26	0.47	0.62	0.35	0.10	-0.01	0.02	-0.13

Table 8. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Flow of Soil Moisture at the Depth of 30 cm During Sept. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-30	B2-30	0.03	-0.03	0.00	0.03	0.08	0.23	0.30	0.30	0.15	0.01	0.38
B2-30	B3-30	-0.07	0.14	0.33	0.18	0.34	0.67	0.24	0.06	0.08	0.04	-0.05
B3-30	B4-30	-0.13	-0.07	0.03	0.01	0.18	0.73	0.46	0.23	0.33	0.14	-0.08
B4-30	B5-30	-0.10	-0.02	0.13	0.15	0.38	0.92	0.31	0.15	0.19	0.02	-0.12
B5-30	B6-30	-0.08	0.05	0.19	0.19	0.39	0.94	0.35	0.14	0.16	0.01	-0.13
B6-30	B7-30	-0.15	0.04	0.16	0.09	0.36	0.76	0.37	0.14	0.18	0.11	-0.07
B7-30	B8-30	-0.21	0.19	0.07	-0.08	0.15	0.63	0.19	0.01	0.01	-0.02	-0.03

Table 9. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Soil Moisture Recharge from the Depth at 10 cm to 30 cm During Sept. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-10	B2-30	0.02	0.04	-0.01	-0.06	-0.02	0.06	0.07	0.03	0.03	0.09	-0.05
B2-10	B3-30	-0.01	0.05	0.08	-0.01	0.11	0.36	0.42	0.40	0.45	0.46	0.37
B3-10	B4-30	-0.07	0.04	0.09	0.19	0.61	0.83	0.39	0.22	0.15	0.02	-0.07
B4-10	B5-30	-0.09	0.01	0.11	0.16	0.47	0.84	0.20	0.11	0.16	-0.03	-0.17
B5-10	B6-30	-0.07	0.06	0.17	0.23	0.50	0.91	0.39	0.16	0.14	-0.01	-0.14
B6-10	B7-30	-0.04	0.03	0.07	0.18	0.67	0.70	0.24	0.15	0.12	-0.01	-0.21
B7-10	B8-30	-0.05	0.16	0.04	-0.06	0.32	0.56	0.11	0.00	0.00	-0.02	-0.03

Table 10. Prewhitened Cross Correlation Analysis for Lateral Soil Moisture Return Flow from the Depth at 30 cm to 10 cm During Sept. 2007; Initial Point: Causal Soil Moisture; Final Point: Resulting Soil Moisture

Initial Point	Final Point	Lag (bi-hours)										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
B1-30	B2-10	0.23	0.30	0.30	0.32	0.33	0.23	0.40	0.27	0.15	0.16	0.16
B2-30	B3-10	-0.06	0.08	0.18	0.18	0.24	0.67	0.59	0.24	0.09	0.07	0.02
B3-30	B4-10	-0.16	-0.10	-0.03	-0.05	0.09	0.65	0.54	0.24	0.28	0.17	-0.04
B4-30	B5-10	-0.13	-0.04	0.12	0.17	0.41	0.91	0.42	0.20	0.16	0.04	-0.11
B5-30	B6-10	-0.26	-0.04	0.16	0.22	0.24	0.77	0.65	0.21	0.07	0.04	-0.05
B6-30	B7-10	-0.25	-0.03	0.17	0.23	0.27	0.74	0.66	0.27	0.13	0.10	-0.01
B7-30	B8-10	-0.06	0.03	0.12	0.17	0.29	0.56	0.51	0.14	0.06	-0.02	-0.06

대해서 상대적으로 민감하다는 것을 의미하며, 하부사면 지점의 경우 두 기간 사이의 차이가 상대적으로 작게 나타난다. 전체적으로는 상대적으로 강우강도가 낮은 9월에서 10월에 이르는 토양수분의 반응 기작이 보다 넓은 상관영역을 보인다. 이는 상대적으로 높은 강우강도를 가진 8월의 배수 기작이 비교적 짧은 반응시간을 보인다는 것을 의미한다. Figs. 3(a) and (b)의 비교에도 나타나듯이 8월의 경우 토양구조체와 대공극 흐름이 수문기작에 일정한 역할을 하는 것으로 보이는 반면, 9월과 10월의 경우는

대공극 흐름보다 상대적으로 긴 반응시간을 가지는 토양구조체 흐름이 주요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 설마천 범륜사 우측 산지사면의 수문 기작을 이해하기 위해서, 토양수분관측시스템을 설치하고 토양수분시계열 자료를 확보하였다. 확보된 자료의 상관성분석을 위해서, 선백색 자료처리방법을 도입하여, 토양

수분 시계열에서 강우의 추계학적 구조를 제거하였다. 확보된 잔차 시계열의 상관분석을 통해서, 대상사면의 연직 흐름, 수평흐름, 충전흐름, 복류수 흐름의 흐름경로에 대한 인과 분석을 수행하였다. 흐름 경로별로 나타난 상관함수의 분포는 사면의 위치, 흐름관계, 강우강도와 연계하여 설명될 수 있었고, 장마철의 경우는 상부사면에서 하부사면으로 진행되면서 불확실성은 감소되고, 대부분의 관계가 일정한 양상으로 수렴함을 확인할 수 있었다. 복류수와 충전흐름의 경우, 가을철의 경우는 장마철보다 보다 지체되고 넓은 상관관계가 나타났는데, 이는 상대적으로 건조한 토양수분의 조건에서 흐름경로의 연결과 단락이 불규칙하게 일어나는 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 장마철의 경우는 토양구조체와 대공극 흐름이 모두 중요한 지배인자이지만, 가을철의 경우는 토양구조체의 흐름이 주요한 역할을 하는 것이 장마철의 상관관계보다 상대적으로 지체된 가을철 토양수분관계에 대한 설명이 될 수 있다.

대상유역에서 토양수분시계열을 사용한 기존 연구는 토양수분과 강우와의 관계를 규명하고, 이를 지형 등의 토양수분 제어인자와 연계하여 설명하는 내용이다. 토양수분간의 상관관계를 규명하는 본 연구는 토양수분중 강우의 추계구조 제거를 수행하는데 한정되어있다. 침투와 관련된 추가적인 추계구조의 제거를 통한 심도 깊은 인과 분석과 더불어, 보다 확장된 자료에 대한 지속적인 연구는 국내 사면에서의 수문기작을 이해하는데 중요한 후속 연구이다. 대상사면을 포함한 국내사면의 수문기작에 대한 지속적인 관측과 이의 확장발전에 대한 노력은, 기반이 일천한 한국 산지사면에서의 수문 기작 연구를 위해서 지속적인 열정이 필요한 분야이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)와 교육과학기술부의 BK21의 지원을 받아 연구되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

한국건설기술연구원 (2006). 시험유역의 운영 및 수문특성조사, 건기연 2006-062.

Anderson, M.G., and Kneale, P.E. (1980). "Topography and hillslope soil water relationships in a catchment at low relief." *Journal of Hydrology*, Vol. 47, pp. 115-128.

Beven, K., and Kirkby, M.J. (1979). "A physically

based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrological Science Bulletin*, Vol. 24, pp. 43-69.

Box, G.E.P., and Cox, D.R. (1964). "An analysis of transformation." *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, Vol. 26, pp. 211-252.

Chaplot, V., and Walter, C. (2003). "Subsurface topography to enhance the prediction of the spatial distribution of soil wetness." *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 2567-2580.

Ford, C.R., Goranson, C.E., Mitchell, R.J., Will, R.E., and Teskey, R.O. (2005). "Modeling canopy transpiration using time series analysis: A case study illustrating the effect of soil moisture deficit in *Pinus taeda*." *Agricultural Forest Meteorology*, Vol. 130, No. 3-4, pp. 163-175.

Guntner, A., Seibert, J., and Uhlenbrook, S. (2004). "Modeling spatial patterns of saturated area: An evaluation of different terrain indices." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 5, W05114.

Kim, S. (2009a). "Multivariate analysis of soil moisture history for a hillslope." *Journal of Hydrology*, Vol. 374, No. 3-4, pp. 318-328.

Kim, S. (2009b). "Characterization of soil moisture responses on a hillslope to sequential rainfall events during late autumn and spring." *Water Resources Research*, Vol. 45, W09425.

Kim, S., and Kim, H. (2007). "Stochastic analysis of soil moisture to understand spatial and temporal variation of soil wetness at a steep hillside." *Journal of Hydrology*, Vol. 341, No. 1-2, pp. 1-11.

Kim, S., Lee, H., Woo, N.C., and Kim, J. (2007). "Soil moisture monitoring on a steep hillside." *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 2910-2922.

Knotter, M., and de Gooijer, J.G. (1999). "TARSO modeling of water table depths." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 3, pp. 695-705.

Liu, L.M., and Hanssens, D.M. (1982). "Identification of multiple-input transfer function models." *Communications in Statistics*, Vol. 11, No. 3, pp. 297-314.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 59-79.

Ridolfi, L., D'Odorico, P., Porporato, A., and Rodriguez-

- Iturbe, I. (2003). "Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope." *Journal of Hydrology*, Vol. 272, No. 1-4, pp. 264-275.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., and Lane, W.L. (1988). Applied modeling of hydrologic time series. Water Resource Publication. Chelsea, Michigan.
- Soil Moisture Equipment Corp. (2005). TRASE operating instruction. pp. 2-5.
- Torres, R., Dietrich, W.D., Montgomery, D.R., Anderson, S.P., and Loague, K. (1998). "Unsaturated zone processes and hydrologic response of a steep unchanneled catchment." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 1865-1879.
- Uchida, T., Asano, Y., Mizuyama, T., and McDonnell, J. (2004). "Role of upslope soil pore pressure on lateral subsurface storm flow dynamics." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 12, W12401.
- Walker, J.P., Willgoose, G.R., and Kalma, J.D. (2004). "In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques." *Journal of Hydrology*, Vol. 293, pp. 85-99.
- Wilson, D.J., Western, A.W., and Grayson, R.B. (2004). "Identifying and quantifying sources of variability in temporal and spatial soil moisture observations." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 2, W02507.
- Wilson, D.J., Western, A.W., and Grayson, R.B. (2005). "A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture." *Advances in Water Resources*, Vol. 28, pp. 43-54.
- Worrall, F., and Burt, T.P. (1999). "A univariate model of river water nitrate time series." *Journal of Hydrology*, Vol. 214, No. 1-4, pp. 74-90.

논문번호: 11-019	접수: 2011.02.18
수정일자: 2011.04.08/04.21	심사완료: 2011.04.21